第40卷 第1期
2023年1月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 1
Jan. 2023

北方牧区草原内陆河流域径流演变特征及其驱动因素分析

陈红光[1,2,3]，孟凡浩[1,2,3]，萨楚拉[1,2,3]，罗 敏[1,2,3]，王牧兰[1,2,3]，刘桂香[1,4]

（1. 内蒙古师范大学地理科学学院，内蒙古 呼和浩特 010022；2. 内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010022；3. 内蒙古自治区蒙古高原草原灾害与生态安全重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010022；4. 中国农业科学院草原研究所，内蒙古 呼和浩特 010010）

摘 要：内蒙古乌拉盖河流域是典型的干旱半干旱牧区草原内陆河流域，生态系统极为脆弱，气候变暖和人类活动能直接影响水文变化。本研究采用改进的SWAT水文模型、M-K趋势检验、降水-径流量双累积曲线以及情景分析等方法，系统分析了1981—2020年乌拉盖河流域径流时空变化特征，并量化流域不同时期、不同河段气候变化和人类活动对径流影响的差异。结果表明：SWAT模型在乌拉盖河流域的适用性良好，率定期及验证期的NSE及R^2均在0.62以上，PBLAS小于18.8%。近40 a在流域呈暖干化趋势下，径流量在上、中、下游均呈显著减少趋势，且在2000年发生突变。气候变化和过度放牧、盲目开垦以及水利水库建设等人类活动对流域径流变化的贡献率分别为95.84%和4.16%。人类活动对流域不同河段的贡献率也有差异，由上游到下游的贡献率分别为1.69%、4.36%和5.03%。且在不同时间段内的贡献率也有较大的差异，由1980年的88.26%减少到2020年的25.47%，不同时间段内不同人类活动方式导致径流变化趋势及幅度也有差异。研究结果能为牧区草原内陆河流域水资源的可持续利用及合理调度提供参考依据。

关键词：径流；气候变化；人类活动；SWAT模型；乌拉盖河流域

近年来，受气候变化及人类活动加剧的双重影响，水资源在时空上重新分配且洪涝、干旱等灾害频发，特别是在干旱、半干旱区草原内陆河流域尤为明显[1-2]。水资源作为制约草原内陆河流域发展的重要资源[3-4]，其变化无疑对当地生态系统安全及可持续发展产生重大影响。因此，深入剖析流域水文循环的特点，厘定气候变化和人类活动对径流的影响，能够为最大限度减少环境变化对径流产生的不利影响提供理论依据，对干旱区草原内陆河流域的可持续发展具有重要的现实意义[5-6]。

目前定量区分气候变化和人类活动对径流贡献的方法主要有统计分析法、水量平衡法和水文模型模拟法[7]。统计分析法依赖于大量的历史实测数据，因此，在缺乏水文资料的地区难以使用。而水量平衡法主要根据水量平衡建立数学模型，通过改变模型中的单个因子来估算各因子的水文效应；因此，该方法无法了解水文循环物理过程[3,8]。水文模型因其能考虑流域空间异质性且对水文循环物理过程进行刻画而成为目前最佳。如刘柏君[9]、刘酌希[10]、Aawar[11]采用水文模拟途径，定量评估了气候变化和人类活动对不同流域径流变化的影响。然而，目前有关径流演变特征及模拟预测的研究多数集中在世界较大的河流及其支流，很少有学者关注草原内陆河流域，并极少对此类流域从定量的角度进行研究。

乌拉盖河流域作为内蒙古最大的内陆河流域，是乌珠穆沁草原的重要组成部分，同时也是内蒙古自治区重要的畜牧业基地[12]，不仅为该地提供可贵的水资源，而且发挥较大的生态效益，是乌珠穆沁草原的生命线，也是维系草原生产力的重要生态因

收稿日期：2022-07-15； **修订日期：**2022-08-21
基金项目：内蒙古师范大学基本科研业务费专项资金（2022JBQN093，2022JBBJ014）；内蒙古自治区自然科学基金项目（2020BS03042，2020BS04009）；国家自然科学基金项目（41861014）
作者简介：陈红光（1996-），女，硕士研究生，研究方向为水文资源. E-mail: 18847133380@163.com
通讯作者：孟凡浩. E-mail: mfh320@imnu.edu.cn

素[13-14]。此外，由于气候变化及人类活动的持续影响，流域草原面积不断下降，草原沙化以及盐碱化的程度逐渐加重，对牧区草原生态平衡及经济发展带来了极大的威胁[15-16]。然而，目前针对乌拉盖河流域径流变化及其主要驱动要素的分析鲜有报道，特别是2000年实施水土保持政策以来流域径流变化特征及其原因尚不清晰。因此，本研究选取乌拉盖河流域为研究区，结合改进的SWAT水文模型[17]、情景设置[18-19]及数理统计等方法探讨乌拉盖河流域径流的时空变化规律，定量评估不同时段气候变化和人类活动对流域径流的影响。研究结果能够深化对干旱、半干旱草原内陆河流域生态水文过程及演变规律的认识，为内陆河流域水资源的可持续利用及合理调度提供参考依据。

1 研究区概况

乌拉盖河流域(116°20′~119°59′E，44°02′~46°42′N)位于乌珠穆沁草原，海拔796~1937 m(图1)。乌拉盖河流域面积为3×10⁴ km²，是内蒙古最大的内流河流域，河道长度为2×10³ km，多年平均径流量为4.17 m³·s⁻¹(1981—2012年)[16]，并且在河道下游孕育了乌拉盖湿地[20]。湿地地下水资源是人畜用水、小型分散的农田种植灌溉用水、城镇用水及部分工矿业用水的主要来源[20]。乌拉盖河流域属于半湿润、半干旱大陆性气候，年平均降水量由东向西递减，约为250~400 mm，年平均温度约为-0.9 ℃[12]。流域内的地带性植被主要为典型草原，流域东北部为草甸草原植被，西南部为典型草原，中部为两者过渡地带[13]。为了分析乌拉盖河流域不同河段的水文情势，将河道分为上游、中游和下游，乌拉盖水库以上为上游，由乌拉盖水库到胡稍庙为中游、胡稍庙到索林淖尔为下游[16]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

为了构建乌拉盖河流域水文模型，采用的基础数据包括数字高程模型(DEM)、土地利用/覆被、土壤数据、气象数据及实测径流数据。DEM数据来源于美国国家航空航天局(http://www.nasa.gov)，空间分辨率为30 m。为了有效揭示地表覆盖变化的影响，如过度放牧造成的草地退化等，土地利用/覆被数据采用二级分类，分别为林地、高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、水域、耕地、建设用地和沙地8类；空间分辨率为1 km，由中国科学院环境

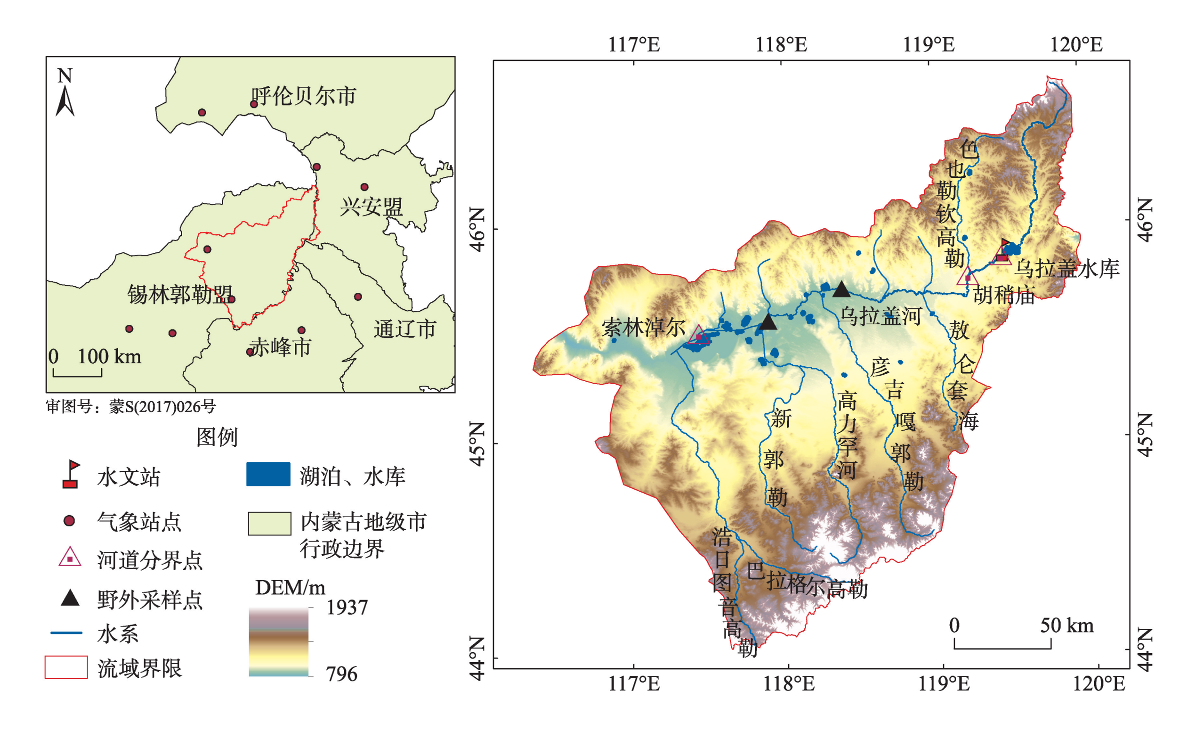


图1 乌拉盖河流域水系及站点分布

Fig. 1 Distribution map of water system and station in the Ulagai River Basin

资源与数据中心免费下载(http://www.resdc.cn),包括1980年、1990年、2000年、2010年和2020年共5期。土壤数据从世界土壤数据库(http://westdc.westgis.ac.cn/data/)获取,空间分辨率1 km。气象数据采用中国气象数据网(http://data.cma.cn)提供的1981—2020年乌拉盖以及周边锡林浩特市、东乌珠穆沁旗等12个气象站点的逐日降水、最高/最低气温、风速、相对湿度等数据。由于牧区草原为缺资料区域,站点实测数据稀少。因此验证模型时采用实测径流数据、实地采样数据、MODIS积雪数据及蒸散发数据进行多目标率定。实测径流数据由1981—2003年奴乃庙水文站和2004—2012年乌拉盖水库入库水文站合成的逐月径流量资料。采样数据为2019—2020年实测水位、断面等换算成为径流量。积雪数据和蒸散发数据分别选择2000—2012年MODIS的MOD10A1和MOD16A2产品,其时空分辨率均为8 d、500 m。通过美国NASA陆地过程分布式数据档案(https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/)免费下载。

2.2 SWAT模型及模拟精度评定

由美国农业部和农业研究局开发的半分布式(Soil and Water Assessment Tool,SWAT)水文模型能很好的模拟流域水文循环过程并能进一步量化流域水文过程对变化环境的响应[21]。本研究采用团队自主改进的SWAT模型,包括改进的融雪模块和子流域分割法[22-23],通过增加累积温度确定条件来分离降雨和降雪类型以及在流域划分时增加土地利用/覆被变化节点来提高模型模拟精度。

为了提高模型的适用性,以水文站实测数据为基础,应用SWAT-CUP软件的SUFI-2算法进行模型参数敏感性和不确定性分析[24-25]。选取纳什效率系数(NES)、均方根误差(PBLAS)、判定系数(R^2)等多个评价指标对模型模拟径流结果进行评价[17]。此外,以MODIS积雪面积和蒸散发数据对模型模拟的积雪面积和蒸散发量曲线的拟合度进行模拟结果的多源验证,以保证模型的适用性及稳定性。评价指标公式如下:

$$\mathrm{NSE}=1-\frac{\sum(Q_i^{\mathrm{obs}}-Q_i^{\mathrm{sim}})^2}{\sum(Q_i^{\mathrm{obs}}-Q^{\mathrm{mean}})^2} \tag{1}$$

$$\mathrm{PBIAS}=\frac{\sum(Q_i^{\mathrm{obs}}-Q_i^{\mathrm{sim}})}{\sum Q_i^{\mathrm{obs}}}\times 100 \tag{2}$$

$$R^2=\frac{n\left(\sum Q_i^{\mathrm{obs}}Q_i^{\mathrm{sim}}-\sum Q_i^{\mathrm{obs}}\sum Q_i^{\mathrm{sim}}\right)^2}{\left[n\sum\left(Q_i^{\mathrm{obs}}\right)^2-\left(\sum Q_i^{\mathrm{obs}}\right)^2\right]\left[n\sum\left(Q_i^{\mathrm{sim}}\right)^2-\left(\sum Q_i^{\mathrm{sim}}\right)^2\right]} \tag{3}$$

式中:Q_i^{obs}为实测值($m^3\cdot s^{-1}$);Q_i^{sim}为模拟值($m^3\cdot s^{-1}$);Q^{mean}为实测均值($m^3\cdot s^{-1}$);n为实测数据量[7]。

2.3 径流突变检验

变化环境下,乌拉盖河流域水文要素无疑会受到一定程度的干预和扰动,本研究采用Mann-Kendall突变检验法用于径流突变分析。与此同时,应用降水-径流量双累积曲线作为突变点的辅助检验。Mann-Kendall趋势检验法(简称M-K法)是由Mann和Kendall提出并改进的统计方法,经常用于分析降水、径流和气温等要素的长时间序列变化[18]。其特点在于对样本数据的分布无要求,受异常值的干扰较小,在水文、气象等数据中适用性良好,且计算简便。当M-K检验突变点时,检验变量S计算公式如下:

$$S_k=\sum_{i=1}^{k}\sum_{j}^{i-1}a_{ij},\ (k=2,3,4,\cdots,n) \tag{4}$$

$$a_{ij}=\begin{cases}1, & x_i>x_j\\ 0, & x_i\leqslant x_j\end{cases}\quad 1\leqslant j\leqslant i \tag{5}$$

$$\begin{cases}UB_K=-UF_K,\\ k=n+1-k\end{cases}\quad (k=1,2,3,\cdots,n) \tag{6}$$

式中:秩序S_k是第i时刻数值大于j时刻数值个数的累计值。通过分析曲线UB_K和UF_K可以表明径流深的变化趋势又可以明确其发生的突变年份。UF_K值的正负代表径流深的增加或减少趋势,UB_K和UF_K是否越过临界值线则表示变化趋势的显著与否,若UB_K和UF_K的交点位于临界线内,该交点为突变点[5]。

降水-径流量双累积曲线是检验两个参数间关系一致性及其变化的常用方法。所谓双累积曲线就是在直角坐标系中绘制的同期内一个变量的连续累积值与另一个变量连续累积值的关系线,可用于水文气象要素一致性的检验、缺值的插补或资料校正,以及水文气象要素的趋势性变化及其强度的分析[18]。本研究以降水和径流深为变量作双累积曲线,将曲线斜率发生明显变化的年份定义为突变年,突变年以前作为基准期,也称人类活动稳定期;突变年以后作为突变期,称人类活动剧烈期。

2.4 区分气候变化与人类活动对径流变化的影响

为了解析近40 a气候变化与人类活动对乌拉盖河流域的综合影响,如暖干化趋势及过度放牧造成的草地退化。本研究选取乌拉盖河流域1981—2020年的气象数据以及过去5个时期(1980年、1990年、2000年、2010年和2020年)土地利用/覆被,结合情景设置法模拟不同变化环境下的径流量。共设置11种情景,分别用s1~s11表示(表1)。情景1(s1)将基准期的气象数据和土地利用/覆被驱动模型,得到基准期土地利用/覆被和气候条件下的径流模拟值。为保证突变期模拟值和基准期的径流量在物理成因上的一致性,情景2和情景3将保持率定好的模型参数不变,模型分别输入突变期气象数据和土地利用/覆被,模拟得到突变期气候和土地利用/覆被条件下的径流值。为了进一步了解不同时段气候变化和人类活动对径流影响的差异,本研究将乌拉盖河流域过去40 a的气候和土地利用/覆被分为4个时段(1980—1990年、1990—2000年、2000—2010年、2010—2020年),将其设置为s4~s11等8个情景。通过以上11种情景分别计算气候以及土地利用/覆被引起的径流变化值,具体表达如下:

$$\Delta Q = \Delta Q_c + \Delta Q_r \tag{7}$$

$$W_c = \frac{\Delta Q_c}{\Delta Q} \tag{8}$$

$$W_r = \frac{\Delta Q_r}{\Delta Q} \tag{9}$$

式中:ΔQ_c 为基准期气候变化引起的径流变化值;Q_r 为突变期人类活动引起的径流变化值;ΔQ 径流总变化值;W_c 气候变化对径流量的贡献率;W_r 人类活动对径流量的贡献率。

3 结果与分析

3.1 SWAT模型校准与验证

本研究建立的SWAT模型将乌拉盖河流域划分成41个子流域和153个水文响应单元。SWAT模型参数较多,采用SWAT-CUP软件对参数进行敏感性分析,选取最敏感的14个参数进行重点率定,得到的敏感参数校准值见表2。模型预热期为1976—1980年,率定期为1981—1998年,验证期为1999—2012年。由站点实测径流数据与模拟径流数据对比来看,径流模拟率定期和验证期评价指标NSE和R^2均高于0.6,PBLAS小于20%(图2a)。乌拉盖河是季节性河流,实测径流表现为夏季径流量较大,冬季断流的特点。改进的SWAT模型能够较好的捕捉径流的季节性分布特征。此外,通过对比MODIS数据与模型模拟的积雪面积、蒸散发结果发现,模拟值与遥感数据拟合较好,且两者的相关系数均高于0.8(图2b、图2c)。根据多目标评定结果来看,模型模拟结果较好,可用于下一步研究。

3.2 乌拉盖河流域径流变化时空特征

根据SWAT模拟结果,1981—2020年乌拉盖河流域年均径流深以1.19 mm·a^{-1}的速率呈显著减少趋势(图3a)。其中,径流深的最大值出现在1998年(183.24 mm),最小值出现在2017年(12.08 mm)。不同河段径流变化趋势与整个流域变化一致,径流最大值均出现在1998年,但径流大小相差甚大(图

表1 模型模拟情景设置

Tab. 1 Model simulation scenario settings

情景	气象数据	土地利用/覆被数据	目的
s1	1980—2000年	1980年	计算乌拉盖河流域突变年前后基准期和突变期气候变化与人类活动对径流贡献率
s2	2000—2020年	1980年	
s3	2000—2020年	2020年	
s4	1980—1990年	1980年	计算1980—1990年气候变化与人类活动对径流的贡献率
s5	1980—1990年	1990年	
s6	1990—2000年	1990年	计算1990—2000年气候变化与人类活动对径流的贡献率
s7	1990—2000年	2000年	
s8	2000—2010年	2000年	计算2000—2010年气候变化与人类活动对径流的贡献率
s9	2000—2010年	2010年	
s10	2010—2020年	2010年	计算2010—2020年气候变化与人类活动对径流的贡献率
s11	2010—2020年	2020年	

表2 参数敏感性分析结果

Tab. 2 Parameter sensitivity analysis results

序号	参数名称	参数含义	取值范围	最终取值
1	CN2	SCS径流曲线系数	30~98	85.19
2	ALPHA_BF	基流消退系数/d	0~1	0.11
3	GW_DELAY	地下水延迟系数/d	0~500	4.36
4	GWQMN	浅地下水产流阈值/mm	0~1000	104.25
5	SFTMP	降雪温度/℃	−10~10	−1.03
6	SMTMP	融雪基准温度/℃	−10~10	2.83
7	SMFMX	最大积雪融化速率/(mm·℃$^{-1}$)	−20~20	8.29
8	SMFMN	最小积雪融化速率/(mm·℃$^{-1}$)	−20~20	2.26
9	SNOCOVMX	100%积雪覆盖时所对应的积雪含水量/mm	0~500	161.40
10	ESCO	土壤层蒸发补偿系数	0~1	0.65
11	EPCO	植物吸收补偿因子	0~1	0.11
12	SOL_K	饱和水力传导系数/(mm·h^{-1})	0~2000	57.90
13	SOL_AWC	土壤有效持水量/mm	0~1	0.36
14	SURLAG	地表径流滞后时间	0~24	13.79

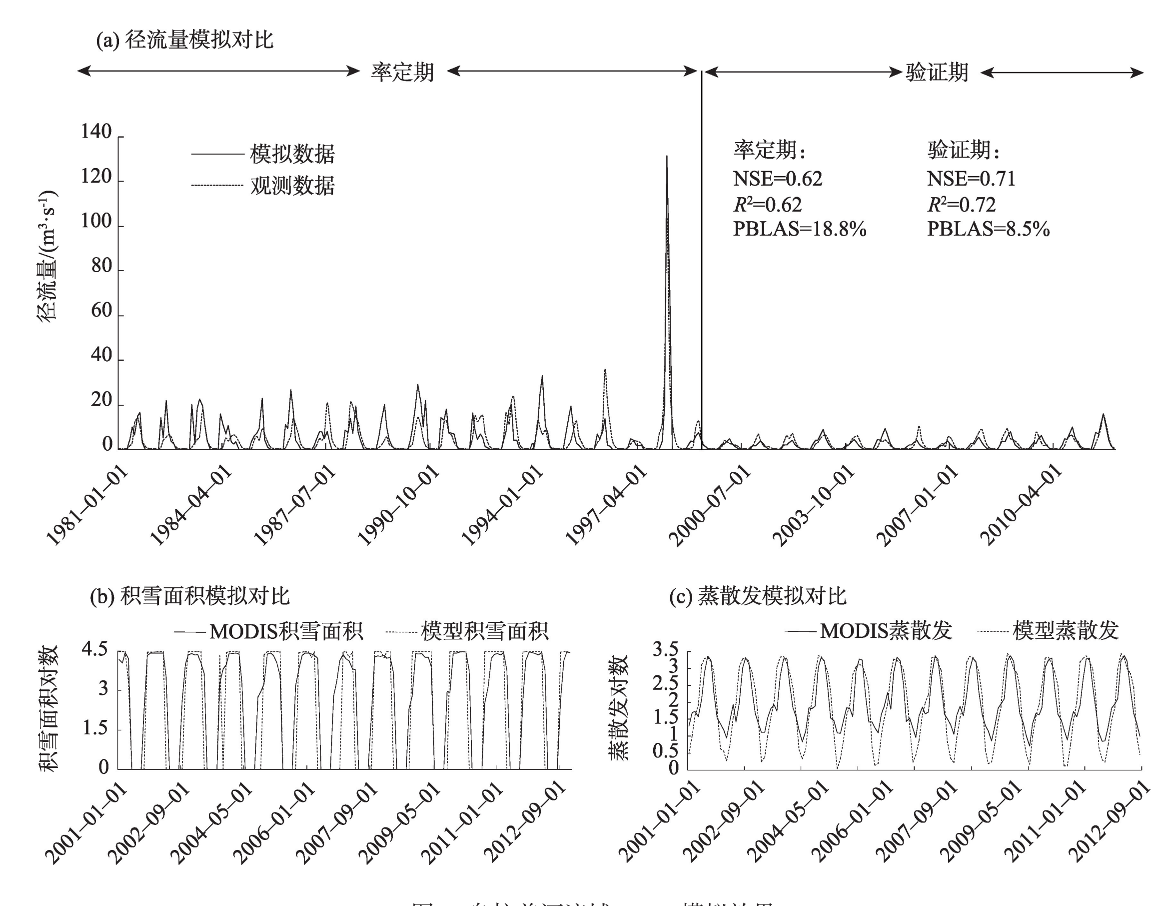


图2 乌拉盖河流域SWAT模拟效果

Fig. 2 SWAT simulation effect of the Ulagai River Basin

3b)。通过M-K检验结果发现,*UF*和*UB*两条曲线在2000年出现交点,且通过显著性检验(图3c),表明在2000年乌拉盖河流域径流量发生明显突变。基于降水-径流量双累积曲线法辅助验证突变年,在2000年以后曲线的曲率出现明显偏移(图3d),同样表明径流深在2000年发生突变。这与研究区附近其他河流的研究结果一致[1,6,18]。

通过分析乌拉盖河流域多年平均径流深的空

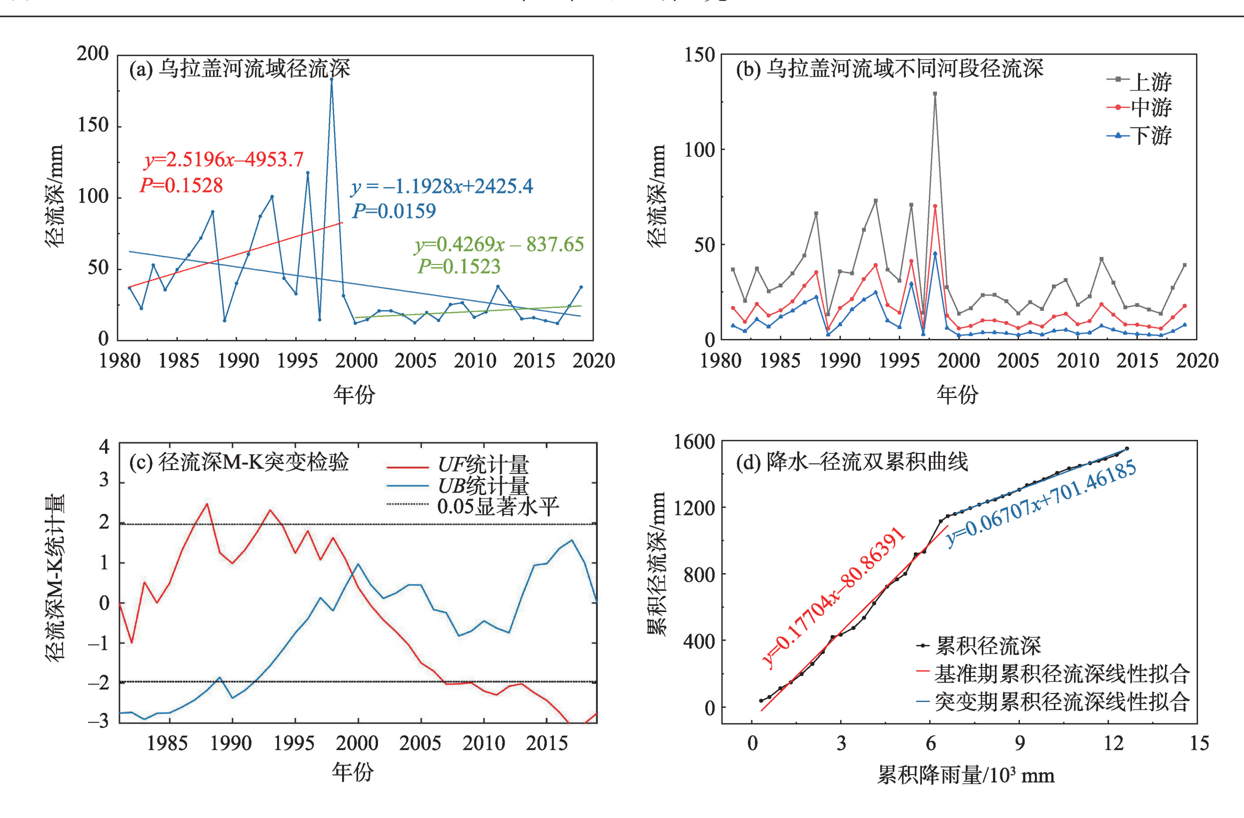


图3 乌拉盖河流域1981—2020年径流时间变化以及突变检验

Fig. 3 Runoff time change and mutation test in the Ulagai River Basin from 1981 to 2020

间分布情况，发现流域中部径流较大，东部径流较小，并且由东向西呈先增大后减小的分布格局，流域上、中游径流较小，下游径流较大(图4a)。由乌拉盖河流域径流深变化的空间分布图来看(图4b)，整个流域径流深均呈不同程度的增加趋势，且变化幅度大小与时空分布格局相近，下游低海拔区域较上中游增加趋势更为明显。

3.3 乌拉盖河流域径流归因分析

3.3.1 乌拉盖流域不同河段径流变化归因分析 根据突变检验结果将研究时段分为基准期(1981—

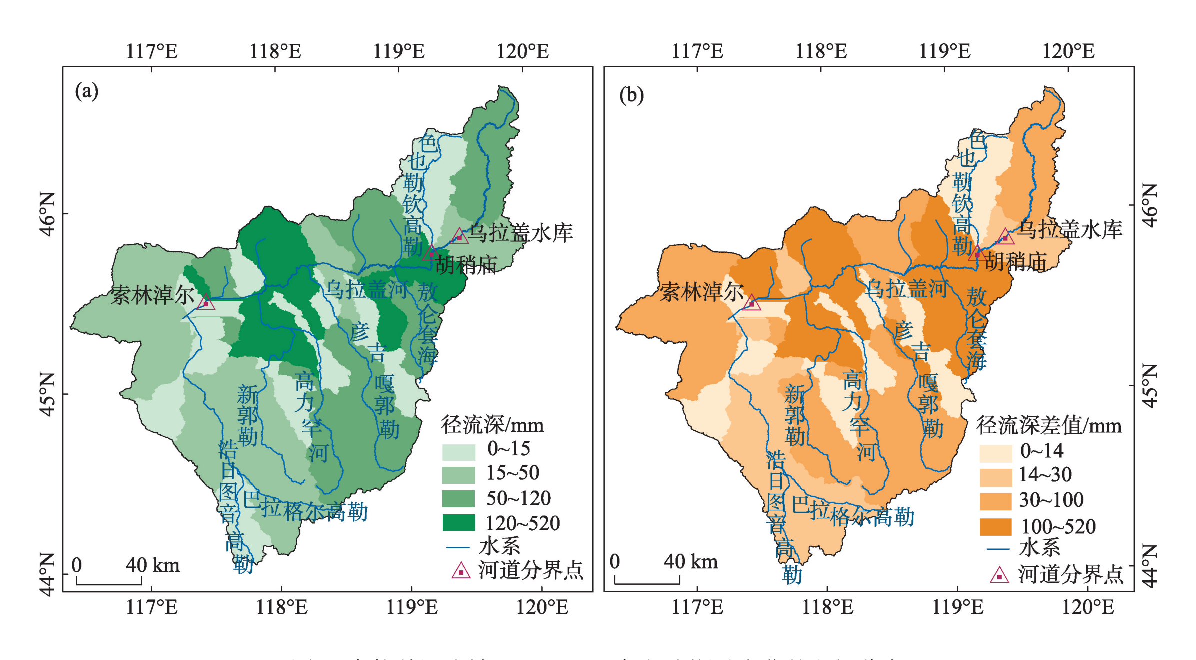


图4 乌拉盖河流域1981—2020年径流深及变化的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of runoff depth in the Ulagai River Basin from 1981 to 2020 and spatial distribution of variation

1999年）和突变期（2000—2020年）。再结合情景s1~s3结果发现，气候变化使年均径流量减少40.07 mm，贡献率为95.84%；人类活动使年均径流量减少1.74 mm，贡献率4.16%。因此，气候变化是乌拉盖河流域径流变化的主要原因。乌拉盖河流域自基准期之后气温持续增加、降水量减少，径流量也随之减少，突变期较基准期的降水量减少了14%，气温增加了0.82 ℃，总径流量减少了69.20%。降水量减少、气温增加使径流量减少，但是多年径流深的相对变化远大于降水量和气温的变化。这表明人类活动对径流量的影响程度也不容忽视[26]。如图5所示，气候变化和人类活动对于乌拉盖河流域不同河段的影响不尽相同，人类活动对上、中、下游的贡献率分别为1.69%、4.36%和5.03%。

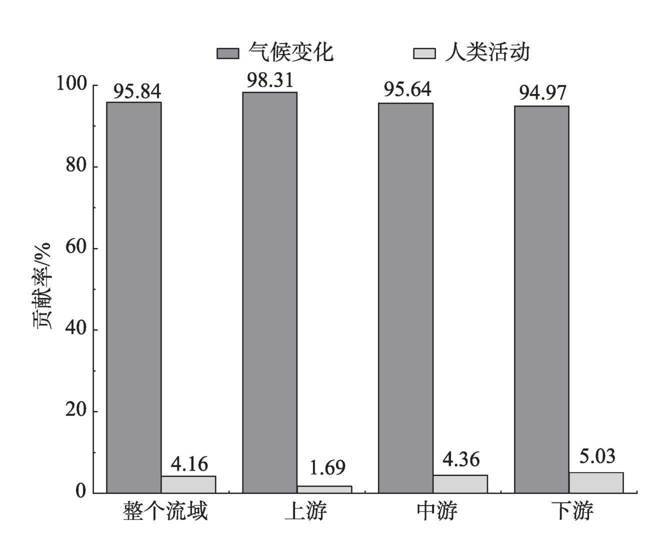


图5　乌拉盖河流域径流变化归因

Fig. 5　Attribution of runoff changes in the Ulagai River Basin

3.3.2　乌拉盖河流域不同时段径流变化归因分析　为了明晰不同时间段内气候变化和人类活动对乌拉盖河径流的影响程度及差异，根据5期土地利用/覆被数据将研究时期划分为不同的4个时段。结合情景（s4~s11）分别研究1980—1990年、1990—2000年、2000—2010年和2010—2020年不同时段内的径流演变特征，量化气候变化和人类活动对径流变化的贡献。可以看出，不同时段气候变化和人类活动对流域径流的贡献率均不相同，并且有正负两种影响（图6）。在4个不同时段内气候变化对径流量的贡献率逐渐减少，由88.26%减少到25.47%。而在2000—2010年内气候变化和人类活动均对径流产生了负面影响，贡献率分别为-48.41%和-51.19%。

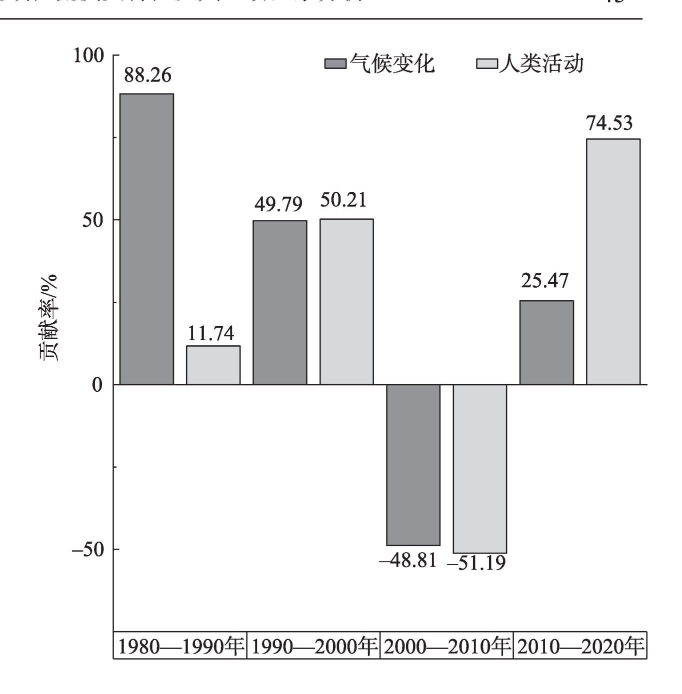


图6　乌拉盖河流域不同时段气候变化与人类活动对径流的贡献率

Fig. 6　Contribution of climate change and human activities to runoff at different times in the Ulagai River Basin

4　讨论

对于水资源缺乏的干旱半干旱牧区草原内陆河流域，降水成为了主要水量补给来源。总体而言，1981—2020年乌拉盖河流域降水量平均值为323.89 mm，在1998年达到峰值（552.73 mm），以8.91 mm·$(10a)^{-1}$的速率呈减少趋势。近40 a气温以波动形式上升，升温速率可达0.43 ℃·$(10a)^{-1}$，使该流域呈暖干化趋势（图7）。研究显示，流域暖干化的背景下径流量以11.93 mm·$(10a)^{-1}$的速率减少。而M-K检验和降水-径流量双累积曲线的结果均显示年均径流深在2000年发生突变，这表明乌拉盖河流域径流量在2000年之前主要受气候变化的影响，而后受气候和人类活动的共同影响。流域附近的其他流域径流也存在着突变现象，且突变期总径流量小于基准期总径流量[8,27]。表示突变年后径流量的减少受气候变化及过度放牧、盲目开垦以及水利水库建设等人类活动的双重影响。乌拉盖河流域暖干化的趋势，在一定程度上导致径流量减少。然而，突变期较基准期多年径流深的相对变化远大于降水量和气温的变化，凸显了过度放牧、盲目开采、以及不合理的农业灌溉等人类活动对径流的负面影响。在经济快速发展和人口持续增加的过程中城市扩张、工矿用地增多、道路建设均会产生耗水

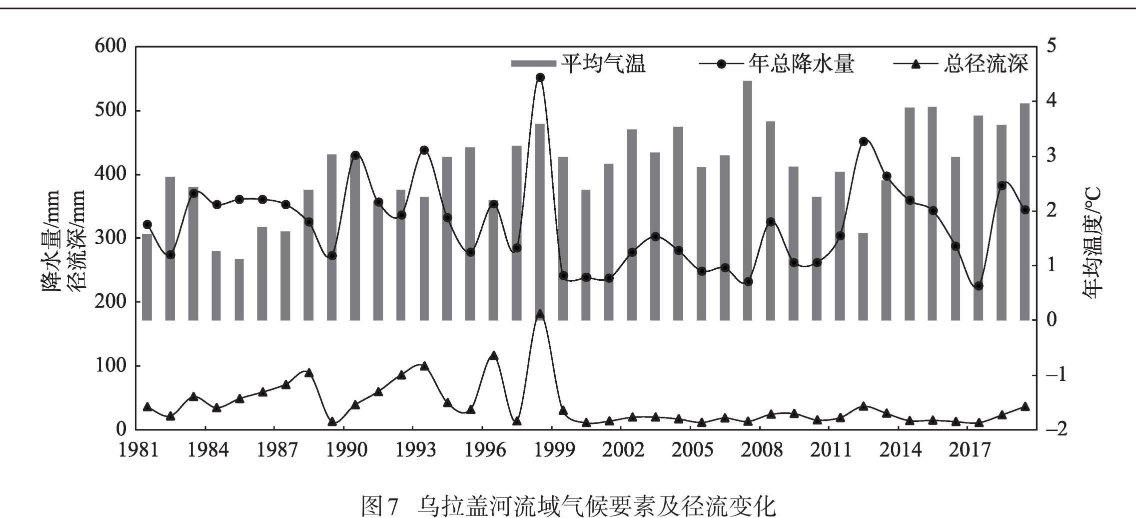


图7 乌拉盖河流域气候要素及径流变化

Fig. 7 Changes in climatic elements and runoff runoff in the Ulagai River Basin

增加[6]。据统计，乌拉盖河流域建设用地面积由1980年的53.66 km^2增加到2020年的264.13 km^2。此外，该流域畜牧业更加发达，研究时段内牲畜数量持续增加，2000年以4×10^6头的数量达到近40 a最高值。过度放牧等不合理的人类活动导致牧区草原植被退化，使雨水拦蓄能力下降，从而加速水土流失[27]。而人类活动对上、中、下游的影响也不尽相同，贡献率分别为1.69%、4.36%和5.03%。不同河段的土地利用/覆被类型、工业以及畜牧业发展的不同程度可能会导致这种差异。如流域上游长期以来以农业发展为主，且降水量较高、温度较低，径流受人类活动的影响较小。而以草地覆被为主的下游区域，主要依靠畜牧业为生。而下游牲畜数量的增加以及建立工矿等人类生活方式使耗水量增加，从而减少水资源[27]。

通过模拟乌拉盖河流域5个时期不同土地利用/覆被条件下的径流过程并结合下垫面变化以及政府实施的工程措施，5个时段的产流比如表3所示，1980—2020年研究区暖干化趋势下流域径流呈先增加后减少趋势，1981—2000年径流均呈增加趋势，增加了18.45 mm；2000—2020年呈减少趋势，总径流减少了39.85 mm。上述分析表明，突变年（2000年）后人类活动是乌拉盖河流域径流显著减少的重要因素，而土地利用/覆被变化是人类活动的集中体现形式之一[28]。

由乌拉盖河流域近40 a土地利用/覆被可知（图8），发现1981—2020年流域内耕地面积先增后减，林地和草地面积变化趋势与之相反，这与乌拉盖河流域毁林毁草开荒到退耕还林还草相对应[29-30]。1981—2000年径流持续的增加，其原因为该时段流域发展第一产业，流域牲畜总量为2000—2020年的将近2倍[18]。过度开垦、超载养畜以及灌溉量的增加等导致下垫面的改变，一定程度上削弱了其对雨水的拦蓄作用，使径流量增加[18]。此外，突变分析结果显示，与基准期相比降幅达到69.20%。尽管2000年开始政府采取一系列水土保持措施，导致耕地面积减少以及疏林地和低覆盖度草地面积的增加，在一定程度上减少了出口断面的径流量，防止了水土流失[27]。然而，同时间内锡林郭勒盟第二、三产业迅猛发展，建立乌拉盖水库为附近的煤矿、

表3 乌拉盖河流域不同时段产流比

Tab. 3 Ratio of production to flow in the Ulagai River Basin at different times

年份	人类活动方式	地表径流/mm	壤中流/mm	地下径流/mm	总产水量/mm
1980年	原始状态	8.41	18.12	18.02	45.55
1990年	过度开垦	20.69	15.28	14.26	50.91
2000年	过度放牧	12.60	31.82	23.00	64.00
2010年	退耕还林还草	3.28	11.80	1.10	15.19
2020年	持续水土保持工程	8.30	13.34	2.40	24.15

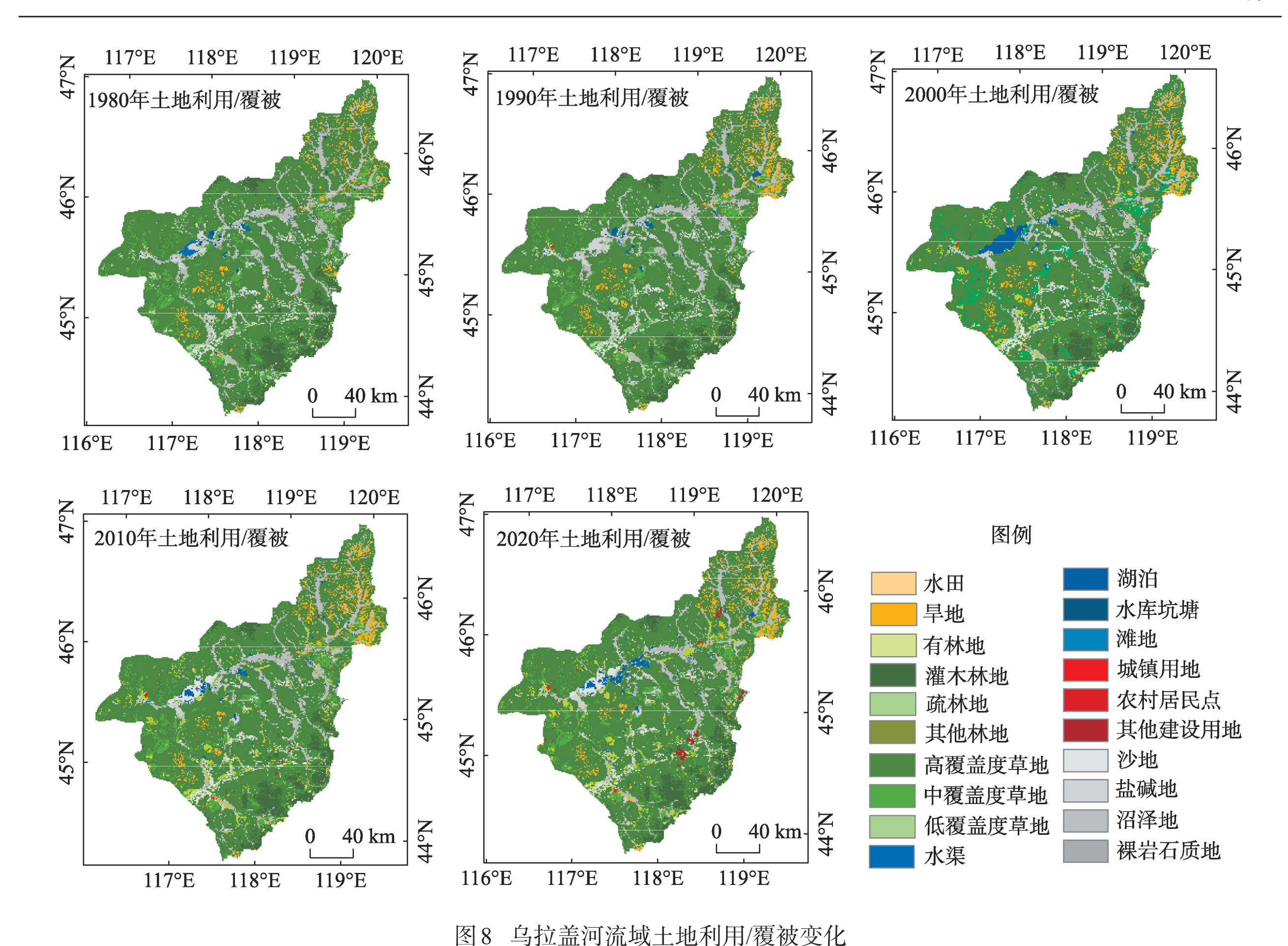


图8　乌拉盖河流域土地利用/覆被变化

Fig. 8　Land use/cover change in the Ulagai River Basin

石油的开采提供工业用水[31]，年度工业用水量达到了4750 m³。这极大地消耗了乌拉盖河流量，导致2010年后径流量急速下降。因此，径流的减少不仅受土地利用/覆被，还包括人口增长和经济发展导致对水资源的开发利用等因素。流域内从2000年开始实施了一系列生态保护措施，包括"退耕还林还草"、"京津风沙源治理"，"未封禁牧"等水土保持措施[27]，但径流量在2000年依旧呈增加趋势，而在2010年开始减少，这表明水土保持措施具有一定的滞后效应。

5　结 论

（1）SWAT模型在乌拉盖河流域的径流模拟适用性良好，率定期及验证期径流模拟结果与实测径流的NSE及R^2均在0.62以上，PBLAS小于18.8%。除此之外，MODIS积雪面积、蒸散发与模型模拟值的拟合系数均高于0.80。

（2）近40 a降水减少及气温增加的背景下，乌拉盖河流域年均径流深以1.19 mm·a^{-1}的速率呈显著减少趋势，且在2000年发生突变。空间上由东向西呈先增大后减小的分布格局。

（3）乌拉盖河流域气候变化是径流变化的主要驱动因子，对径流的贡献率为95.84%。对不同河段的贡献率也有所差异，对上、中、下游的贡献率分别为98.31%、95.64%和94.97%。对于不同时间段，流域气候变化对径流的贡献率逐渐减少，由1980年的88.26%减少到2020年的25.47%。而不同人类行为活动导致径流变化趋势及幅度也有较大的差异。

参考文献（References）：

[1] 高瑞忠, 白勇, 刘廷玺, 等. 内蒙古高原典型草原内陆河流域径流的时序演变特征[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 10–17. [Gao Ruizhong, Bai Yong, Liu Tingxi, et al. Evolution characteristics of runoff in the typical grassland inland river basin of Inner Mongolia Plateau[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 10–17.]

[2] Luo M, Liu T, Meng F, et al. Spatiotemporal characteristics of future changes in precipitation and temperature in Central Asia[J]. International Journal of Climatology, 2019, 39(3): 1571–1588.

[3] 白勇, 高瑞忠, 王喜喜, 等. 内蒙古巴拉格尔河径流变化的驱动因素[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 296–305. [Bai Yong, Gao Ruizhong, Wang Xixi, et al. Driving factors causing the change of runoff volume of the Balager River in Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 296–305.]

[4] 叶培龙, 张强, 王莺. 1980—2018年黄河上游气候变化及其对生态植被和径流量的影响[J]. 大气科学学报, 2020, 6(43): 967–979. [Ye Peilong, Zhang Qiang, Wang Ying, et al. Climate change in the upper Yellow River and its impact on ecological vegetation and runoff from 1980–2018[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 2020, 6(43): 967–979.]

[5] 潘竟虎, 李真. 干旱内陆河流域生态系统服务空间权衡与协同作用分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 280–289. [Pan Jinghu, Li Zhen. Analysis of trade-offs and synergies of ecosystem services in arid inland river basin[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2017, 33(17): 280–289.]

[6] 张阿龙, 高瑞忠, 刘廷玺, 等. 高原内陆河流域气候水文突变与生态演变规律——以内蒙古锡林河和巴拉格尔河流域为例[J]. 中国环境科学, 2019, 39(12): 5254–5263. [Zhang Along, Gao Ruizhong, Liu Tingxi, et al. Identification on hydrometeorology mutation characteristics and ecological evolution pattern of the plateau inland river basin: Taken Xilin River and Balager River of Inner Mongolia for instance[J]. China Environmental Science, 2019, 39(12): 5254–5263.]

[7] 窦小东, 黄玮, 易琦, 等. LUCC及气候变化对龙川江流域径流的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(1): 7–15. [Dou Xiaodong, Huang Wei, Yi Qi, et al. Effects of LUCC and climate change on the runoff in Longchuan River Watershed[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(1): 7–15.]

[8] 王威娜, 高瑞忠, 王喜喜, 等. 锡林河流域径流变化规律及气候波动和人类活动影响的定量分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 347–353. [Wang Weina, Gao Ruizhong, Wang Xixi, et al. Quantitative analysis of runoff variation as affected by climate variability and human activity in the Xilin River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2): 347–353.]

[9] 刘柏君, 周广钰, 雷晓辉, 等. 海流兔河基流特征及其对气候变化和人类活动的响应分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(5): 56–61. [Liu Bojun, Zhou Guangyu, Lei Xiaohui, et al. Analysis of baseflow characteristics and its responses to climatic change and human activities in Hailiutu River basin[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(5): 56–61.]

[10] 刘酌希, 陈鑫, 管晓祥, 等. 变化环境下洮河流域径流变化归因[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 87–92. [Liu Zhuoxi, Chen Xin, Guan Xiaoxiang, et al. Attribution of runoff change in Taohe River Basin under a changing environment[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5): 87–92.]

[11] Aawar Taha, Khare Deepak. Assessment of climate change impacts on streamflow through hydrological model using SWAT model: A case study of Afghanistan[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2020, 6(3–4): 1427–1437.

[12] 王淑芳. 内蒙古乌拉盖河流域近20年植被覆盖变化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2013. [Wang Shufang. Reaserch on in Recent 20 Years of Vegetation Cover Change Inner Mongolia Ulgai River Basin[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2013.]

[13] 高学磊, 布仁图雅. 乌拉盖近十五年生态状况评估及驱动因素分析[J]. 环境与发展, 2015, 27(2): 30–35. [Gao Xuelei, Burentuya. Ecological status evaluation and driving factors analysis of Wulagai over the past 15 years[J]. Environment and Development, 2015, 27(2): 30–35.]

[14] 彭聚睿. 乌拉盖管理区经济发展对策研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2016. [Peng Jurui. Study on Measures of Economic Development for Wulagai Management District[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2016.]

[15] 张义, 刘钟龄. 乌拉盖河及其主要支流的水资源评价与合理利用的探讨[J]. 干旱区资源与环境, 1999, 13(1): 55–65. [Zhang Yi, Liu Zhongling. Stady on water resources assessment and reasonable use of Wulagai river and its main tributary[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1999, 13(1): 55–65.]

[16] 苏布达, 易津, 陈继群, 等. 内蒙古乌拉盖草原湿地中下游植被退化演替趋势分析[J]. 中国草地学报, 2011, 33(3): 73–78. [Su Buda, Yi Jin, Chen Jiqun, et al. Analysis of vegetation degeneration succession trend in middle and lower reaches of Wulagai Wetland of Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Grassland, 2011, 33(3): 73–78.]

[17] 张田田, 陈有超, 李潜, 等. 土地利用变化对丹江流域径流和泥沙时空格局的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(8): 1797–1811. [Zhang Tiantian, Chen Youchao, Li Qian, et al. Effect of land-use change on the spatio-temporal patterns of runoff and sediment in the Danjiang River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(8): 1797–1811.]

[18] 张艳霞, 于瑞宏, 薛浩, 等. 锡林河流域径流量变化对气候变化与人类活动的响应[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 67–76. [Zhang Yanxia, Yu Ruihong, Xue Hao, et al. Response of runoff volume change to climate change and human activities in the Xilin River Basin[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 67–76.]

[19] 田晶, 郭生练, 刘德地, 等. 气候与土地利用变化对汉江流域径流的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(11): 2307–2318. [Tian Jing, Guo Shenglian, Liu Dedi, et al. Impacts of climate and land use/cover changes on runoff in the Hanjiang River Basin[J]. Journal of Geographical, 2020, 75(11): 2307–2318.]

[20] 张连义, 刘爱军, 邢旗, 等. 乌拉盖湿地的生态环境现状及可持续发展对策研究[J]. 科学管理研究, 2005, 23(2): 117–120. [Zhang Lianyi, Liu Aijun, Xing Qi, et al. Current stiuation sustainable utilization and developing countermeasure of Wetland Resources in Wulagai[J]. Scientific Management Research, 2005, 23(2): 117–120.]

[21] 保广裕, 乜虹, 戴升, 等. 黄河上游河源区不同量级降水对径流

变化的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 704-713. [Bao Guangyu, Mie hong, Dai sheng, et al. Research on effects of different precipitation magnitudes on runoff changes in the headwater region of the upper Yellow River[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 704-713.]

[22] Duan Y, Meng F, Liu T, et al. Sub-daily simulation of mountain flood processes based on the modified soil water assessment tool (SWAT) model[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(17): 3118.

[23] Luo M, Liu T, Meng F, et al. Identifying climate change impacts on water resources in Xinjiang, China[J]. Science of The Total Environment, 2019, 676: 613-626.

[24] 宋玉鑫, 左其亭, 马军霞. 基于SWAT模型的开都河流域水文干旱变化特征及驱动因子分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 610-617. [Song Yuxin, Zuo Qiting, Ma Junxia, et al. Variation characteristics and dynamic drivers of drought in Kaidu River Basin based on SWAT model[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 610-617.]

[25] 安晨, 方海燕. 基于SWAT模型的妫水河流域径流空间分布特征[J]. 水文, 2021, 41(4): 81-87. [An Chen, Fang Haiyan. Spatial distribution characteristics of runoff in Guishui River Basin based on SWAT model[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(4): 81-87.]

[26] 霍军军, 伊明启, 王静, 等. 拉萨河流域径流对土地利用和气候变化的响应分析[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(10): 33-39. [Huo Junjun, Yi Mingqi, Wang Jing, et al. Response of runoff in Lhasa River Basin to land use and climate change[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(10): 33-39.]

[27] 杨立哲. 锡林河近50 a径流变化特征及其影响因素分析[J]. 草业科学, 2015, 32(3): 303-310. [Yang Lizhe. Analysis of runoff variations and impact factors in Xilinhe River Basin in recent 50 years[J]. Pratacultural Science, 2015, 32(3): 303-310.]

[28] 窦小东, 彭启洋, 张万诚, 等. 基于情景分析的LUCC和气候变化对南盘江流域径流的影响[J]. 灾害学, 2020, 35(1): 84-89. [Dou Xiaodong, Peng Qiyang, Zhang Wancheng, et al. Impacts of LUCC and climate change on runoff in the Nanpan River Basin based on scenario analysis[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(1): 84-89.]

[29] 陈盼盼. 近20年乌拉盖河流域植物群落演替和植被动态变化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019. [Chen Panpan. Study on Plant Community Succession and Vegetation Dynamics in the Wulagai Basin in the Past 20 Years[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2019.]

[30] 陈宽. 锡林郭勒盟植被覆盖度变化及影响因素分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021. [Chen Kuan. Analysis on the Change of Vegetation Coverage and its Influencing Factors in Xilingol League[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2021.]

[31] 刘亚红, 石磊, 常虹, 等. 锡林郭勒盟生态系统格局演变及驱动因素分析[J]. 草业学报, 2021, 30(12): 17-26. [Liu Yahong, Shi Lei, Chang Hong, et al. Analysis of driving factors that influence the pattern and quality of the ecosystem in Xilingol League[J]. Acta Pratacul Turae Sinice, 2021, 30(12): 17-26.]

Analysis of the characteristics of runoff evolution and its driving factors in a typical inland river basin in arid regions

CHEN Hongguang[1,2,3], MENG Fanhao[1,2,3], SA Chula[1,2,3], LUO Min[1,2,3], WANG Mulan[1,2,3], LIU Guixiang[1,4]

(1. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 2. Key Laboratory of Remote Sensing and Geographic Information System of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 3. Key Laboratory of Disaster and Ecological Security on the Mongolia Plateau of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 4. Grassland Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract: The Ulagai River Basin in Inner Mongolia is a typical inland river basin in the pastoralist grasslands of the arid and semi-arid regions with extremely fragile ecosystems, and climate warming and human activities can directly affect hydrological changes. In this study, we used the improved SWAT (Soil and Water Assessment Tool) hydrological model, M-K trend test, precipitation-runoff double accumulation curve, and scenario analysis to systematically analyze the spatial and temporal characteristics of runoff in the Ulagai River Basin from 1981 to 2020 and to quantify the differences between climate change and human activities on runoff in different periods and river sections. The differences in the impact of climate change and human activities on the runoff in different periods and river sections were quantified. The results show that the SWAT model significantly impacted runoff in the Ulagai River Basin from 1981 to 2020. The results show that the SWAT model has good applicability in the Ulagai River Basin, with NSE and R^2 above 0.62 and PBLAS less than 18.8% for both the periodic and validation periods. Under the warm and dry trend of the basin in the past 40 years, the runoff volume decreased significantly in the upper, middle, and lower reaches, then a sudden change occurred in 2000. Considering the contribution of human activities such as climate change and overgrazing, blind reclamation and construction of water conservancy reservoirs to the change of runoff in the basin was 95.84% and 4.16%, respectively. Also, the contribution of human activities to different river segments in the basin varied, with 1.69%, 4.36%, and 5.03% from upstream to downstream. The contribution rates also differed significantly across different periods, from 88.26% in 1980 to 25.47% in 2020. The trend and magnitude of runoff changes due to different human activity patterns in different periods also differed. This study's results can provide a reference basis for the sustainable use and rational scheduling of water resources in the inland river basin of pastoral grasslands.

Keywords: runoff; climate change; human activities; SWAT model; Ulagai River Basin